

УДК 681.5

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.186485

Розробка методу захисту тягової електромережі від струмів короткого замикання, основаної на новій ознаці

П. Є. Михаліченко, І. С. Білюк, О. С. Кириченко, В. А. Надточій, А. В. Надточій

Всі види релейного захисту основані на порівнянні значень певних ознак при нормальних та аварійних режимах роботи системи. Запропоновано нову ознаку визначення аварійного режиму системи тягового електропостачання постійного струму, а саме, швидкість спадання наруги фідера тягової підстанції. Як відомо, при короткому замиканні в тяговій мережі її напруги знижується. Найбільш різке, практично лінійне, її зменшення спостерігається, по-перше в перший момент часу аварійного перехідного процесу, і, по-друге, в місці короткого замикання і в точках поблизу нього. Тому крутизна фронту такого зменшення фідерної напруги може бути ознакою короткого замикання. Дана ознака дозволяє визначати вид короткого замикання за дальністю від джерела живлення. Крім того, запропоновані схемні рішення реалізації системи захисту, оснований на цій ознаці. Розглядається три варіанта побудови таких систем захисту. Перший варіант з використанням RC фільтра. Другий варіант з використанням імпульсного трансформатора. Третій варіант полягає у використанні мостової схеми. Кожна схема має свої переваги та недоліки, але сучасна електроніка та цифрова техніка дозволяють реалізувати будь яку з них. Це у перспективі сприятиме побудові селективного за дальністю захисту від КЗ. Для цього необхідно використовувати стільки комплектів захисту, скільки точок вздовж тягової лінії необхідно контролювати. Така система також легко реалізується програмними засобами з використанням мікропроцесорної техніки.

Практичні результати, отримані при дослідженні в ділянці тягового електропостачання Придніпровської залізниці, дозволяють стверджувати що запропонований спосіб визначення коротких замикань є досить ефективним. Його можливо використовувати як додаткову (дублюючу систему) в загальній релейній-захисній апаратурі. Це підвищить надійність систем електропостачання тягових мереж. Загалом розглянутий спосіб визначення коротких замикань може бути використаний у будь-якій електроенергетичній системі постійного струму

Ключові слова: коротке замикання, напруга фідера, швидкість зміни напруги, релейний захист, тривалість спаду напруги, селективний захист

1. Вступ

Як відомо, всі види захисту електротехнічних систем від аварійних режимів роботи основані на певних ознаках. Саме на порівнянні значень цих ознак

при нормальному та аварійному станах електротехнічної системи покладено принцип роботи захисних пристроїв.

В системах релейного захисту тягового електропостачання такими ознаками є: максимальний струм фідера, кидки струмів, крутизна фронту зростання струму фідера, стала часу тощо. Це обумовило наявність струмових видів захисту (максимальної струмової, струмової відсічки, максимальної імпульсної струмової), захистів, що реагують на перехідні процеси – по швидкості зростання фідерного струму чи його стрибок (приріст). Проте захист від такого режиму як коротке замикання в тяговій мережі, можливо будувати за іншими ознаками. Необхідність пошуку таких ознак пов'язана з неоднозначністю визначення моменту виникнення короткого замикання в тягових електромережах, що приводить до збоїв в роботі захисної комутаційної апаратури.

Використання захисту побудованого на новій ознаці короткого замикання в тяговій мережі перш за все дозволить підвищити надійність тягових електромереж та зменшити їх аварійність. Як наслідок, це дозволить зменшити витрати на ліквідацію аварій і втрати часу на відновлення транспортних мереж. Захист на новій ознаці може функціонувати як окрема система або може бути інтегрованим в традиційну релейну захисну апаратуру фідера тягової мережі.

2. Аналіз публікацій та постановка завдання

У роботі [1] представлені результати досліджень динамічних процесів в електричній станції метрополітену. Показано, що підвищення енергоефективності електричної тяги вимагає оптимізації динамічних режимів. Коротке замикання (КЗ) в тягових електромережах – це найнапруженіший динамічний режим. Для запобігання і подолання КЗ призначено систему захисту. У визначенні короткого замикання головну роль відіграють такі параметри, як опір і струм лінії [2]. Незважаючи на значний прогрес у створенні різноманітних математичних моделей, не існує загального методу визначення параметрів тягової мережі в динамічних режимах [1–3]. Це пов'язано зі значними розбіжностями у конструктивних особливостях, характеристиках та топологіях тягових мереж, а також їх навантаженнях. Ця обставина обумовлює пошук більш універсальних технологій захисту від коротких замикань.

Прослідковуються три напрямки пошуку таких технологій. Перший напрямок – це удосконалення існуючих або традиційних систем. Так, в роботі [4] для захисту шунтуючих реакторів з магнітним керуванням в лініях електропередач пропонується схема захисту, що поєднує два критерії. Ці критерії засновані на загальному керуючому струмі та ідентифікації еквівалентної індуктивності розсіювання. Аварійний режим може визначатися за оцінкою теплової потужності в мережі [5] і т. і.

Другий напрямок – це поєднання традиційних систем захисту з цифровими обчислювальними платформами та спеціальним програмним забезпеченням. Цю стратегію можна назвати інтелектуалізацією релейного захисту [6–8]. Фактично, це додаткові алгоритми захисту у звичайних системах захисту, які залишаються основними у високовольтних системах електропередач. Також до даної стратегії можна віднести методи захисту на основі багатокритеріальних систем з нейрон-

ними мережами [9]. Серед інших, до таких відносяться і системи захисту, елементи яких інтегровані в конструктивні вузли мереж, такі як перетворювальні пристрої, монтажна арматура, ізолятори тощо [10].

Третій напрямок – це пошук нових систем захисту, заснованих на нових ознаках аварійного режиму. Так, в роботі [11] пропонується схема захисту лінії на основі біжучої хвилі. В роботі [12] обґрунтовано можливість захисту тягових електромереж на основі непродуктивних втрат в мережі.

Ефективність кожної з технологій удосконалення систем захисту визначається конкретними умовами застосування і залежить від конструктивних особливостей мережі, їх електричних характеристик та навантаження.

Для тягових електромереж постійного струму, що діють в Україні, ефективний захист може бути заснований на вимірюванні інтервалу зміни фідерної напруги як ознаки КЗ.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є розробка методу оцінювання режиму КЗ тяговій мережі постійного струму на основі нової ознаки.

Для досягнення поставленої мети були поставлені такі завдання:

- встановити залежність тривалості спаду фідерної напруги від режиму короткого замикання в тяговій мережі;
- обґрунтувати принципи роботи захисту від короткого замикання заснованого на ознаці часового інтервалу спаду фідерної напруги;
- довести ефективність нового способу захисту тягової мережі постійного струму від коротких замикань.

4. Встановлення залежності тривалості спаду фідерної напруги від режиму короткого замикання в тяговій мережі

Порівнюючи основні ознаки, на яких базується вищезазначені види захисту, можна зробити наступні висновки. При значних відстанях між підстанціями, струми віддаленого короткого замикання (малі струми) близькі за значенням з максимальними струмами навантаження нормального режиму, а інколи і менше них. По крутизні фронту зростання струму і сталої часу кола також не можна напевно визначати режим тягової мережі, оскільки в нормальних умовах і при короткому замиканні у багатьох випадках ці показники майже однакові. Кидки струму при короткому замиканні, як правило, вище ніж в нормальному режимі. Виняток складає режим зняття живлення (якщо $t_{\text{пер}} > 0,5$ с) з повторним відновленням напруги, але такий режим є частим в практиці експлуатації. Потенціальний захист також володіє недоліками – необхідністю побудови спеціальної провідної лінії для кожної пари блокуючих вимикачів реле мінімальної напруги, що встановлюються в різних необхідних точках тягової мережі. Зазначені недоліки ознак, а значить і власне систем захисту, зобов'язують спеціалістів електротехніків працювати над пошуком інших ознак (принципів) побудови релейного захисту.

Як відомо, при короткому замиканні в тяговій мережі її напруги знижується. Найбільш різке, практично лінійне, її зменшення спостерігається, по-перше

в перший момент часу аварійного перехідного процесу, і, по-друге, в місці короткого замикання (до нуля при металічному короткому замиканні) і в точках поблизу нього (рис. 1–3). Тому ознакою, на якій може бути побудовано захист, є крутизна фронту такого зменшення фідерної напруги $\left. \frac{du_{\Phi}}{dt} \right|_{t=0}$. Швидкість du_{Φ}/dt різна в залежності від відстані місця короткого замикання до фідера з розглядуваним u_{Φ} .

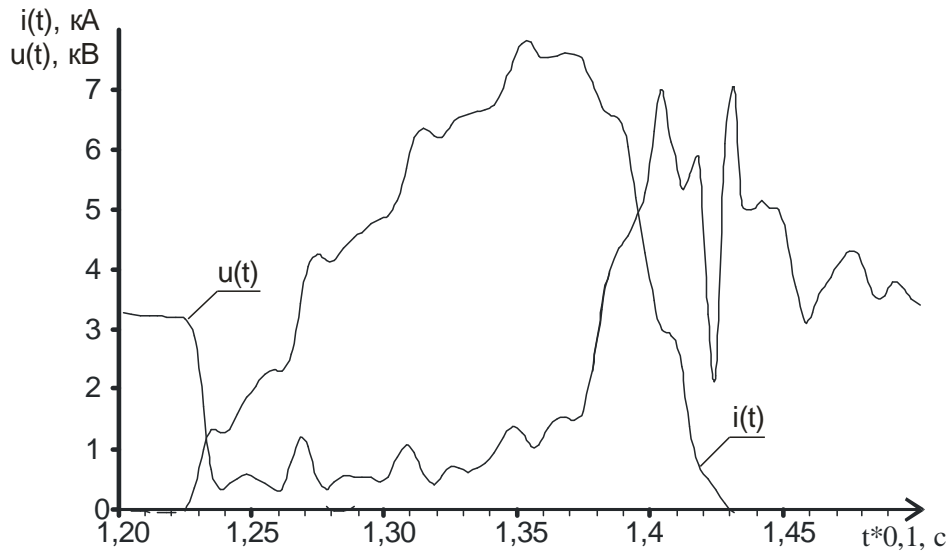


Рис. 1. Експериментальні дослідження близького КЗ ТП Верхівцево, 2×ВАБ-43

С метою теоретичного обґрунтування можливості використання крутизни фронту $\left. \frac{du_{\Phi}}{dt} \right|_{t=0}$ для створення захисту ввімкнено між фідером та рейкою вітку $R_d C$ (яку назвемо «ланкою захисту») (рис. 2).

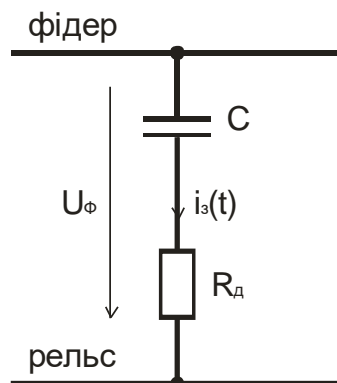


Рис. 2. Захисна $R_d C$ ланка для системи захисту за кидком напруги

До моменту короткого замикання струм $i_q(t)$ в цій вітці не протікав, внаслідок того, що фідерна напруга u_{Φ} є постійною (розглядається ідеальний випадок), рівною деякому початковому значенню $U_{\Phi H}$.

В момент початку короткого замикання напруга u_Φ починає з точки «н» лінійно зменшуватися (рис. 3), нехай до деякого значення $U_{\Phi K}$, до точки «к». Виконаємо зміщення моменту виникнення короткого замикання (точка «н») з початком відліку часу «0», тобто в момент виникнення і подальшого протікання перехідного процесу зменшення фідерної напруги $u_\Phi(t)$.

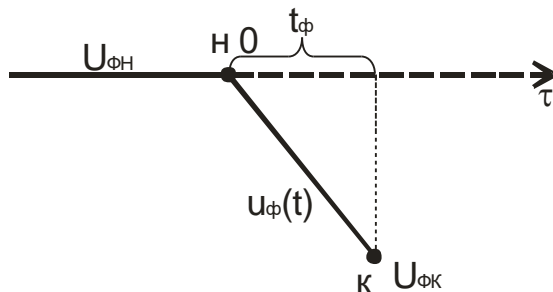


Рис. 3. Часова діаграма фідерної напруги в момент короткого замикання

Під дією змінної (зменшення) напруги $u_\Phi(t)$, прикладеної до «вітки захисту», в останній починає протікати струм $i_3(t)$. Визначимо його за допомогою інтеграла Дюамеля, згідно якого можна записати:

$$i_3(t) = \int_0^t \frac{du_\Phi}{dt} G(t - \tau) d\tau, \quad (1)$$

де $G(t)$ – перехідна провідність простого $R_d C$ -кола «вітки захисту» (рис. 2). Ця провідність дорівнює шуканому перехідному струму $i_3^1(t)$ кола (рис. 2) при її включенні на одиничну напругу. Для $R_d C$ – кола перехідна провідність визначається виразом

$$G(t) = i_3^1(t) = \frac{1}{R_0} e^{-\frac{t}{T_3}}, \quad (2)$$

де $T_3 = R_d C$ – стала часу кола з «віткою захисту».

Тоді підставимо (2) в (1), для моментів часу перехідного процесу $0 \leq t \leq t_\Phi$ (рис. 3) величину струму $i_q(t)$ можна записати

$$i_3(t) = \frac{1}{R_0} \int_0^t \frac{du_\Phi}{dt} e^{-\frac{(t-\tau)}{T_3}} d\tau. \quad (3)$$

Згідно експериментальних даних (осцилограма короткого замикання рис. 1), в момент часу виникнення короткого замикання, падіння напруги на фідері тягової підстанції $u_\Phi(\tau)$ лінійно спадає, його можна описати рівнянням

$$u_{\Phi}(\tau) = \frac{U_{\Phi K} - U_{\Phi H}}{t_{\Phi}} \tau \quad (4)$$

і тоді її похідна представляє собою деяку сталу величину

$$\frac{du_{\Phi}}{dt} = \frac{U_{\Phi K} - U_{\Phi H}}{t_{\Phi}}, \quad (5)$$

а, відповідно, цю похідну можна винести за знак інтеграла виразу (3), після інтегрування якого, з врахуванням формули для T_q , отримаємо

$$\begin{aligned} i_3(t) &= \frac{du_{\Phi}}{dt} \frac{1}{R_d} \int_0^t e^{-\frac{t}{T_3}} e^{\frac{\tau}{T_3}} d\tau = \frac{du_{\Phi}}{dt} \frac{1}{R_d} e^{-\frac{t}{T_3}} \left(T_3 e^{\frac{\tau}{T_3}} \right) \Big|_0^t = \\ &= \frac{du_{\Phi}}{dt} \frac{R_d C}{R_d} e^{-\frac{t}{T_3}} \left(e^{\frac{t}{T_3}} - 1 \right) = C \frac{du_{\Phi}}{dt} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_3}} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Якщо стала часу T_3 (6) достатньо велика, а t_{Φ} дуже маленька $\left(e^{-\frac{t}{T_3}} \approx 1 \right)$, і тоді

$$i_3(t) = C \frac{du_{\Phi}}{dt} \Big|_{t=0}. \quad (7)$$

Тобто, згідно (6) та (7) струм $i_3(t)$ у «вітці захисту», що знаходиться під дією спаду фідерної напруги, прямо-пропорційний швидкості зменшення цієї напруги на початку її зміни. Інакше кажучи крутизні спаду фідерної напруги.

5. Обґрунтування принципів роботи захисту від короткого замикання заснованого на ознаці швидкості спаду фідерної напруги

Дамо теоретичне обґрунтування роботи ряду (в тому числі і деяких відомих) принципових схем релейних пристроїв захисту, які базуються на отриманих, згідно нової ознаки, виразів (6) та (7).

Найбільш простою є схема на основі шунта з $r_{ш}$, представлена на рис. 4, де r_p , L_p – активний опір та індуктивність реле.

Для неї згідно закону Кірхгофа маємо:

$$i_3 - i_{ш} - i_p = 0, \quad (8)$$

$$r_{ш} i_{ш}(t) = r_p i_p(t) + L_p \frac{di_p}{dt}. \quad (9)$$

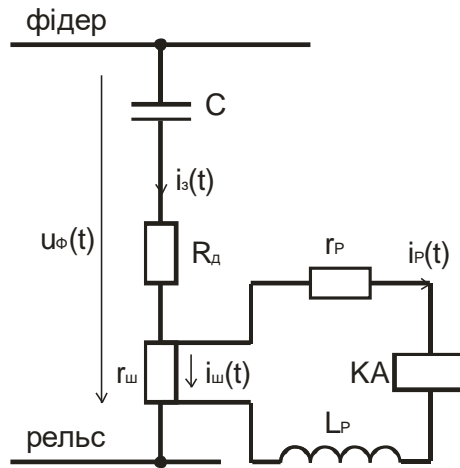


Рис. 4. Ввімкнення струмового реле у $R_d C$ вітку захисту через шунт

Розв'язавши систему рівнянь (6), (8), (9) отримаємо:

$$i_p(t) = \frac{r_{ш} C}{r_{ш} + r_p} \frac{du_{\phi}}{dt} \left(1 - e^{-t/T_3} \right) - \frac{L_p / r_p}{\frac{r_{ш}}{r_p} + 1} \frac{di_p}{dt}. \quad (10)$$

Якщо підібрати реле так, щоб його стала часу $T_p = L_p / r_p$ була настільки мала, що можна було знехтувати другою складовою у виразі (10), тоді для інтервалу часу $0 \leq t < t_{\phi}$ (рис. 3) отримаємо:

$$i_p(t) = \frac{r_{ш} C}{r_{ш} + r_p} \frac{du_{\phi}}{dt} \Big|_{t < t_{\phi}} \left(1 - e^{-t/T_3} \right), \quad (11)$$

тобто практично

$$i_p(t) \sim \frac{du_{\phi}}{dt} \Big|_{t < t_{\phi}}.$$

Розглянемо схему, в якій джерелом сигналу, для розглянутого захисту, є спеціальний трансформатор струму з повітряним проміжком (рис. 5).

В режимі короткого замикання і тим самим при зміні фідерної напруги $u_{\phi}(t)$ у «вітці захисту» з'являється змінний струм $i_3(t)$. В результаті, внаслідок явища взаємоіндукції, на вторинній обмотці трансформатора струму ТА індукується ЕРС взаємоіндукції, яка створює на затискачах вторинної обмотки напругу від взаємоіндукції:

$$u_2(t) = M \frac{di_3}{dt}, \quad (12)$$

де M – коефіцієнт взаємодуції між обмотками трансформатора струму.

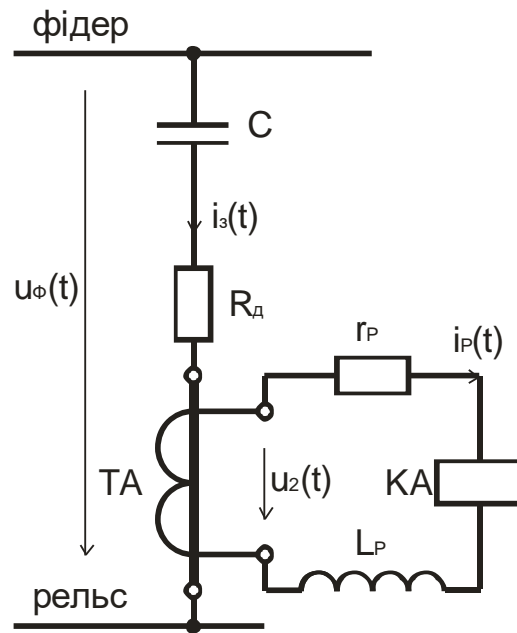


Рис. 5. Ввімкнення струмового реле в $R_d C$ вітку захисту через трансформатор струму

З іншої сторони, для контура з реле струму по 2-ому закону Кірхгофа:

$$u_2(t) = r_p i_p(t) + L_p \frac{di_p}{dt}. \quad (13)$$

Прирівняємо (12) до (13) і підставимо замість $i_q(t)$ вираз (6), отримаємо:

$$MC \frac{d}{dt} \left[\frac{du_\phi}{dt} \left(1 - e^{-t/T_3} \right) \right] = r_p i_p(t) + L_p \frac{di_p}{dt}. \quad (14)$$

Оскільки функція $u_\phi(t)$ на початковій стадії короткого замикання є лінійною, то крутизна її фронту, тобто du_ϕ/dt , величина стала і тоді після диференціювання лівої частини рівності (14) прийме вигляд:

$$\frac{M}{R_d} \frac{du_\phi}{dt} e^{-t/T_3} = r_p i_p(t) + L_p \frac{di_p}{dt}. \quad (15)$$

Розділивши обидві частини рівності (15) на R_p та прийнявши, що стала часу T_p маленького значення, що другою складовою правої частини виразу (15) можна знехтувати, кінцево отримаємо

$$i_p(t) = \frac{M}{R_\phi r_p} \frac{du_\phi}{dt} \Big|_{t < t_\phi} e^{-t/T_3}. \quad (16)$$

Таким чином, струм реле струму (тобто його реакція) прямо пропорційна крутизні фронту імпульсу спадання фідерної напруги.

Розглянемо роботу захисту по схемі моста, в діагональ якого ввімкнено реле (рис. 6). Завдяки рівним активним опорам R плеч, міст при нормальних режимах роботи (навіть якщо U_ϕ буде не ідеально згладженим) буде знаходитися в рівновазі, тоді $u_{24}(t)=0$ і струм реле $i_p(t)$ також дорівнюватиме 0 ($i_p(t)=0$).

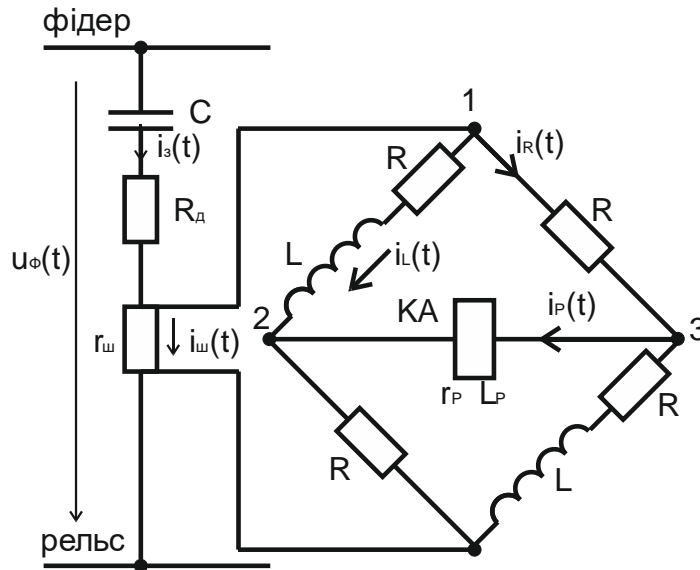


Рис. 6. Ввімкнення струмового реле через мостову схему

При різкій зміні $u_\phi(t)$ струм $i_3(t) \neq 0$. І якщо стала часу моста T_M буде дуже маленького значення у порівнянні із сталою часу «вітки захисту» T_3 , то при малому струму через реле $i_p(t)$ струм через плече моста буде рівним:

$$i_R = i_L = \frac{r_w}{2R} i_w. \quad (17)$$

Для контуру 1-2-3-1 рис. 6 маємо

$$-Ri_L(t) - L \frac{di_L}{dt} + r_p i_p(t) + L_p \frac{di_p}{dt} + Ri_R(t) = 0 \quad (18)$$

чи з врахуванням рівності $i_R = i_L$:

$$L \frac{di_L}{dt} = r_p i_p(t) + L_p \frac{di_p}{dt}. \quad (18)$$

Для вузла з шунтом рис. 6:

$$i_3(t) = i_M(t) + i_{ш}(t).$$

Відповідно для вузла 1:

$$i_M(t) = i_R(t) + i_L(t) = 2i_L(t).$$

Тоді $i_3(t) = i_{ш}(t) + 2i_L(t)$, звідки

$$i_{ш}(t) = i_3(t) - 2i_L(t). \quad (19)$$

Підставимо в (19) вираз (6) для $i_3(t)$ і струм $i_{ш}(t)$ з виразу (17), отримаємо:

$$\frac{2R}{r_{ш}} i_L = C \frac{du_{\Phi}}{dt} \left(1 - e^{-t/T_3} \right) - 2i_L. \quad (20)$$

З цього виразу струм i_L дорівнює:

$$i_L = \frac{Cr_{ш}}{2(R + r_{ш})} \frac{du_{\Phi}}{dt} \left(1 - e^{-t/T_3} \right). \quad (21)$$

Підставимо (21) в (18) і про диференціювавши, отримаємо:

$$\frac{Lr_{ш}}{2(R + r_{ш})R_{д}} \frac{du_{\Phi}}{dt} e^{-t/T_3} = r_p i_p(t) + L_p \frac{di_p}{dt}. \quad (22)$$

Поділивши обидві частини рівності (22) на r_p та враховуючи, що стала часу T_p настільки маленька, що можна знехтувати складовою $L_p(di_p/dt)$, кінцево отримаємо:

$$i_p(t) = \frac{Lr_{ш}}{2(R + r_{ш})R_{д}r_p} \frac{du_{\Phi}}{dt} \Big|_{t < t_{\Phi}} e^{-t/T_3}, \quad (23)$$

тобто реакція реле часу пропорційна швидкості зменшення фідерної напруги.

Слід зазначити, що формули (11), (16) і (23) для струму реле справедливі за умови, що стала часу T_p дуже маленька, чого легко досягти, застосовуючи електронні реле (але дуже важко – у електромагнітних).

6. Перевірка ефективності нового способу захисту тягової мережі від коротких замикань

Як було вище зазначено, всі види релейного захисту ґрунтуються на порівнянні значень певних ознак і при нормальних та аварійних режимах роботи систе-

ми. В запропонованому виді захисту такими ознаками є du_{Φ}/dt , значення якого в режимі короткого замикання приведені в табл. 1 для однієї з ділянок тягового електропостачання філії "Придніпровська залізниця" АТ "Укрзалізниця". Експерименти проводилися за допомогою цифрового осцилографа АСК-3106. Осцилограф має функцію запису цифрових даних на жорсткий носій інформації в форматі *.csv. Умови проведення експериментів, а також їх результати, представлені в роботі [13].

Таблиця 1

Швидкість спаду фідерної напруги в режимі короткого замикання

Тип ШВ	Значення du_{Φ}/dt , kV/s		
	Близьке КЗ	Середнє КЗ	Дальнє КЗ
2×ВAB-43	3214.0	1254.4	586.4
2×ВAB-49	2722.5	712.5	476.5
ВAB-206	2182.8	—	621.5

При відключенні ШВ під час струмового перенавантаження $du_{\Phi}/dt=330$ kV/s. Під час пуску ЕРС фідерна напруга не змінюється.

Для визначення du_{Φ}/dt в нормальному режимі роботи звернемося до такого поняття для електричних мереж постійного струму (згідно ГОСТ 13109-97) як коливання напруги, під яким розуміють швидку зміну, що відбувається зі швидкістю 1...2 % за секунду. Тут 1...2 % – відносне відхилення (амплітуда) коливання напруги δU_t , яке визначають відносною різницею між слідуючими один за одним екстремумами напруги

$$\delta U_t = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\text{ном}}} 100 \, \%.$$

Звідси випливає, максимальна зміна фідерної напруги (згідно цього виразу) складає: $0.02 \times 3.3 = 0.066$ kV за 1 секунду, що значно нижче du_{Φ}/dt , приведених в таблиці.

Тепер розглянемо екстремальне значення зміни фідерної напруги згідно ПТЕ. Як відомо, згідно ПТЕ $U_{\max}=4$ kV, $U_{\min}=2.7$ kV. Тоді саме несприятливе відхилення напруги буде: $4-2.7=1.3$ kV, що значно нижче табличних значень.

З цього короткого аналізу слідує, захист на запропонованому принципі:

- 1) «відрізняє» нормальні та аварійні режими;
- 2) «відрізняє» вид короткого замикання («близьке», «середнє», «дальнє»).

Для цього необхідно на тяговій підстанції встановити три комплекти захисту, в кожен з яких реле струму налаштувати на відповідне значення du_{Φ}/dt . В цьому випадку відповідне реле буде спрацьовувати при відповідному КЗ. Або застосовувати цей принцип в багатопараметричних системах захисту побудованих на мікропроцесорній елементній базі.

7. Обговорення результатів дослідження системи захисту тягової електромережі від струмів короткого замикання, основаної на новій ознаці

Як відомо, в разі короткого замикання, значення сили струму в мережі значно зростає, що може призвести до руйнувань елементів, спалахів і інших серйозних наслідків. Крім того, зі зростанням сили струму збільшуються електродинамічні сили, що впливають на елементи ланцюга, що так само може привести до їх руйнувань. Сучасні системи захисту від коротких замикань як-то струмова відсічка, максимально-струмовий захист в основному побудовані на прямому вимірюванні сили струму в контрольованій мережі за допомогою шунтів, трансформаторів струму, електромагнітних (релейних) систем. Це обумовлює головний недолік цих пристроїв – їх чутливі елементи повинні бути увімкнені послідовно з лінією живлення. Тому вони розраховуються на відповідні номінальні струми і струми короткого замикання в мережі а також на значні електродинамічні навантаження. Крім того, чутливі елементи струмового захисту повинні мати відповідну до напруги мережі ізоляцію. Таким чином, в силових електричних мережах ці пристрої мають порівняно значні масо-габаритні показники. Як показано в [1], робочі струми в тяговій мережі можуть в 4–6 разів перевищувати їх номінальні значення. Такі ж самі струми можуть при певних умовах діяти при коротких замиканнях. Таким чином, існує невизначеність режиму роботи тягової електромережі. Цю невизначеність можна подолати в існуючих системах захисту, таких як струмова відсічка, максимальний струмовий захист та струмовий захист за часом. Проте це вимагає складних процедур по налаштуванню таких систем. Розглянута у рамках даної статті система захисту тягової мережі від струмів короткого замикання заснована на використанні іншої ознаки аварійного режиму. Це дозволяє використовувати чутливі елементи з паралельним приєднанням до контрольованої ділянки мережі. Такій системі захисту для виявлення короткого замикання достатньо контролювати швидкість зміни фідерної напруги du_{ϕ}/dt . Ця величина різна в залежності від відстані місця короткого замикання до фідера з розглядуваним u_{ϕ} , (табл. 1) проте вона знаходиться в таких межах, що характеризує саме коротке замикання а не якийсь інший процес. Як свідчать результати вимірювань (табл. 1), за допомоги даного методу існує можливість побудови систем захисту від коротких замикань з селективністю по відстані до точки замикання. Налаштування такої системи захисту може бути виконане на основі нескладних інструментальних вимірювань силової мережі та підбору параметрів схем захисту, побудованих на використанні РС ланки як чутливого елемента. Для прямої, трансформаторної та мостової схем релейного захисту параметри визначаються за (11), (16) або (23). Вказані залежності показують практично однозначну чутливість розглянутих схем захисту до такого характерного параметра короткого замикання як du_{ϕ}/dt .

Конструктивно, системи захисту від КЗ що побудовані на новій ознаці, в якості сенсора можуть використовувати малопотужні датчики напруги, розмір яких визначається лише класом напруги мережі та відповідно міцністю власної ізоляції.

Слід зазначити, що розглянуті аварійні режими короткого замикання були проведені без наявності електрорухомого складу на дистанції тягового електро-

постачання. Наявність електровозів та електропоїздів буде впливати на величину падіння напруги і як передбачається авторами на швидкість її зміни. Тому подальшою своєю задачею автори вбачають проведення досліджень при наявності електрорухомого складу на ділянках. Проте, проведення натурних експериментів з коротким замиканням на реальній ділянці електрифікованої залізниці з електровозами практично виконати неможливо. На допомогу прийде математичне моделювання. Вхідними даними математичної моделі будуть параметри реальної контактної мережі та реальних електровозів.

8. Висновки

1. При короткому замиканні в тяговій мережі її напруга знижується. Найбільш різке, практично лінійне, її зменшення спостерігається, по-перше, в перший момент часу аварійного перехідного процесу, і, по-друге, в місці короткого замикання. Швидкість du_{ϕ}/dt різна в залежності від відстані місця короткого замикання до фідера. Струм $i_3(t)$ в «вітці захисту», що знаходиться під дією спаду фідерної напруги при короткому замиканні, прямо-пропорційний швидкості зменшення цієї напруги на початку її зміни, тобто крутизни спаду фідерної напруги.

2. Найбільш простою схемою захисту є схема на основі шунта. Також можуть бути використані схеми з пік – трансформатором та мостовою схемою.

3. Захист на основі вимірювання швидкості спаду фідерної напруги дозволяє виявити не тільки саме КЗ. Також даний спосіб «відрізняє» нормальні та аварійні режими і «відрізняє» вид КЗ за дальністю від джерела живлення («близьке», «середнє», «дальнє»).

Література

1. Yatsko, S., Sytnik, B., Vashchenko, Y., Sidorenko, A., Liubarskyi, B., Veretennikov, I., Glebova, M. (2019). Comprehensive approach to modeling dynamic processes in the system of underground rail electric traction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (9 (97)), 48–57. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154520>
2. Wiszniewski, A., Solak, K., Rebizant, W., Schiel, L. (2018). Calculation of the lowest currents caused by turn-to-turn short-circuits in power transformers. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 95, 301–306. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.08.028>
3. Alluhaidan, M., Almutairy, I. (2017). Modeling and Protection for Low-Voltage DC Microgrids Riding Through Short Circuiting. *Procedia Computer Science*, 114, 457–464. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.09.024>
4. Zheng, T., Liu, X., Huang, T. (2019). Novel protection scheme against turn-to-turn fault of magnetically controlled shunt reactor based on equivalent leakage inductance. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 112, 442–451. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.05.002>
5. Tartaglia, M., Mitolo, M. (2010). An Analytical Evaluation of the Prospective I(2)t to Assess Short-Circuit Capabilities of Cables and Busways. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25 (3), 1334–1339. doi: <https://doi.org/10.1109/tpwr.2009.2037505>

6. Sanchez-Sutil, F., Hernández, J. C., Tobajas, C. (2015). Overview of electrical protection requirements for integration of a smart DC node with bidirectional electric vehicle charging stations into existing AC and DC railway grids. *Electric Power Systems Research*, 122, 104–118. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.01.003>
7. Mahmoudian Esfahani, M., Mohammed, O. (2020). An intelligent protection scheme to deal with extreme fault currents in smart power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 115, 105434. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105434>
8. Peres, L. M., Silva, K. M. (2019). Power transformer protection using an instantaneous-current-value negative sequence differential element. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 108, 96–106. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.12.033>
9. Abdali, A., Mazlumi, K., Noroozian, R. (2019). High-speed fault detection and location in DC microgrids systems using Multi-Criterion System and neural network. *Applied Soft Computing*, 79, 341–353. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.03.051>
10. Caramel, C., Austin, P., Sanchez, J. L., Imbernon, E., Breil, M. (2006). Integrated IGBT short-circuit protection structure: Design and optimization. *Microelectronics Journal*, 37 (3), 249–256. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2005.09.028>
11. Jia, Q., Dong, X., Mirsaiedi, S. (2019). A traveling-wave-based line protection strategy against single-line-to-ground faults in active distribution networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 107, 403–411. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.11.032>
12. Mikhalichenko, P., Nadtochii, V., Nadtochiy, A. (2019). Defining energy indicators for detecting short circuits in a dc electric traction system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (8 (101)), 6–14. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.180796>
13. Михаліченко, П. Є. (2012). Результати експериментальних досліджень режимів короткого замикання у тяговій мережі постійного струму. *Вісник ДНУЗТ*, 41, 81–85.